



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA ELETTROROTECNICA

Analisi comparativa delle prestazioni energetiche (termiche ed elettriche)
negli impianti a biomasse

Relatore: Chiar.mo Prof. Arturo Lorenzoni

Laureando: Galiotto Marco
Matricola 575488

Anno Accademico 2010/2011

INDICE

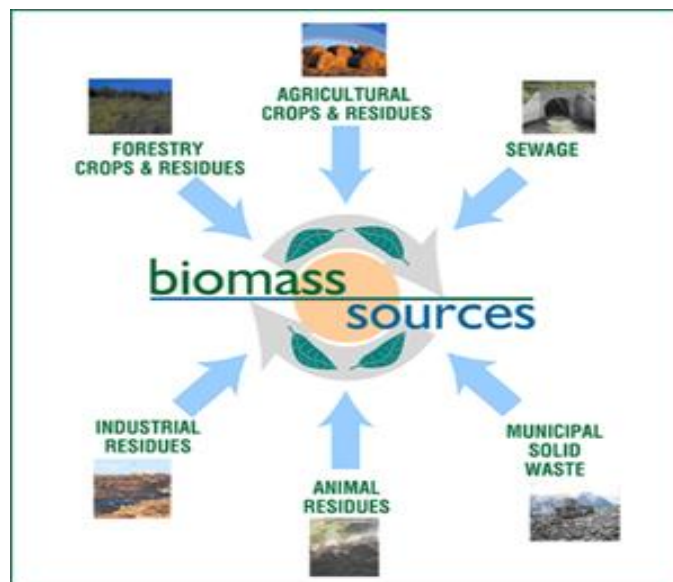
1. Introduzione	3
1.1 Cosa sono le biomasse	3
1.2 Perché utilizzarle	4
1.3 Come sfruttare le biomasse	5
2. Descrizione dei processi e delle tecnologie	6
2.1 I vari tipi di processi	6
2.2 La combustione diretta	7
2.3 La carbonizzazione	7
2.4 La gassificazione	8
2.5 La pirolisi	9
2.6 I processi biochimici	10
2.7 La combustione diretta per la produzione elettrica	11
2.8 La gassificazione per la produzione elettrica	15
3. Analisi	21
3.1 Premessa	21
3.2 Cogenerazione	22
3.3 Digestione anaerobica	23
3.4 Combustione	25
3.5 Gassificazione	26
3.6 Osservazioni	29
4. Conclusioni	32
5. Bibliografia	34

1. INTRODUZIONE

1.1 Cosa sono le biomasse

Con il termine biomasse s'intende una serie di materiali organici, derivanti direttamente o indirettamente dalla fotosintesi clorofilliana, dai quali è possibile estrarre energia. Si può trasformare l'energia chimica posseduta da queste sostanze in energia più facilmente utilizzabile: calore, energia elettrica o biocarburanti. Come si può capire dalla definizione fanno parte delle biomasse una serie eterogenea di materiali, difficilmente accomunabili con un'unica descrizione. Alcune di esse, come vediamo dallo schema, sono:

■ Figural.1: Tipologie di biomasse



- Residui di coltivazioni;
- Residui dell'industria della lavorazione del legno;
- Piante coltivate espressamente per scopi energetici;
- Scarti mercantili;
- Colture acquatiche o liquami;
- Frazione organica del RSU (rifiuto solido urbano).

Sicuramente esistono molte altre sostanze non citate sopra. Fra tutti i vari tipi di biomasse ci sono quelli più utilizzati e, magari, con una certa storia alle spalle, si pensi, ad esempio, alla semplice legna da ardere, ma anche quelle più innovative legate a recenti ricerche per massimizzarne la resa. E', quindi, un settore molto ampio che però ha rischiato di restare in disparte se non fossero emersi tutti i problemi climatici legati all'effetto serra. Bisogna infatti precisare, quando si parla di biomasse, che questa tecnologia ha una densità di energia minore rispetto ai combustibili fossili usati al giorno d'oggi.

Se si confrontano i poteri calorifici inferiori, come nella tabella 1.1, lo si nota in modo chiaro.

■ Tabella1.1 Confronto del potere calorifico inferiore di alcuni combustibili.

Materiale	PCI (Potere calorifico inferiore) kcal/kg
Biomasse	4000-4400
Petrolio grezzo	10000
Metano	7560
Carbone	7500

Dal solo punto di vista energetico il paragone non c'è, prevalgono nettamente il petrolio, il gas e il carbone.

1.2 Perché utilizzarle?

Il vantaggio principale di questa tecnologia sta nelle emissioni. La combustione delle biomasse viene vista come un processo a emissioni zero, se non addirittura negative; ciò non significa che non venga prodotta anidride carbonica, ma quella che nasce dalle reazioni di combustione va a compensare l'anidride assorbita dalla pianta stessa durante la sua vita. Quest'ultimo aspetto, però, è un concetto molto criticato e, forse, un po' ingannevole. Esso è valido sicuramente se ci si sofferma alla sola combustione ma cade nel considerare l'intero ciclo di vita della biomassa. Includendo quindi tutte le operazioni che vanno dalla semina alla raccolta, dal trasporto alla trasformazione, l'anidride emessa non bilancia più quella assorbita, ma la supera. Ciò nonostante va fatta chiarezza sulla differenza tra questo tipo di emissioni e quelle legate ai combustibili fossili. Mentre con le biomasse l'anidride carbonica assorbita dalla pianta verrebbe comunque riemessa non appena il vegetale muore attraverso i normali processi di decomposizione; bruciando petrolio, metano o carbone si immettono in atmosfera quantità di carbonio che erano sedimentate nelle profondità del terreno, e perciò che non contribuivano più al ciclo stesso. Sono due procedimenti ben distinti: uno incrementa il carbonio presente nel ciclo, l'altro invece ne movimentava una quantità già appartenente ad esso. Un'altra caratteristica di questa tecnologia è quella dello stoccaggio di energia. Infatti è possibile accumulare l'energia sotto forma di biomassa pronta all'uso, è un aspetto questo che comporta da un lato facilità di gestione e permette di regolare la produzione anche in modo discontinuo. D'altro canto, però, richiede che la biomassa sia in una forma tale che permetta questo. Ad esempio nascono proprio a causa di queste esigenze i pellet, i quali garantiscono una certa versatilità sia per il trasporto che per lo stoccaggio. Lo svantaggio principale delle biomasse consiste nella limitata capacità di conversione dell'energia solare. Per sopperire a questo si sono

fatte numerose ricerche in campo genetico che hanno portato a risultati eccellenti (vedi il pioppo Din00) ma che lasciano ancora grandi prospettive davanti. La variazione del codice genetico permette di migliorare diversi aspetti: la resistenza agli agenti esterni, la velocità di crescita, favorendo quello che è il processo di conversione. Molti altri studi sono stati fatti: essi vanno dalla genetica sopra detta, alla logistica fino all'ambito agro-economico. I risultati hanno portato a nuove tecniche di coltivazione con lo scopo di ottimizzare la resa del materiale e l'intero ciclo di lavorazione.

1.3 Come sfruttare le biomasse

Come già detto in precedenza, il nodo centrale del problema sta nel convertire l'energia. Viste le numerose tipologie di biomasse per effettuare questo passaggio sono disponibili diversi processi. Occorre, perciò, scegliere il metodo più opportuno per poter massimizzare l'energia in uscita. Questo significa far riferimento a due grandezze specifiche del materiale:

- L'umidità (U);
- Il rapporto di carbonio su azoto (C/N).

I valori di tali grandezze sono importanti per definire il procedimento più efficiente con cui trattare la biomassa. Una distinzione molto usata nella pratica viene illustrata nella tabella 1.2.

■ Tabella 1.2

Caratteristiche del materiale	Tipologia di processo
$U < 50\%$ e $C/N > 30$	Processi Termochimici
$U > 50\%$ e $C/N < 30$	Processi Biochimici
$U < 35\%$ e $C/N > 35$	Esterificazione degli oli

Rimane valido il fatto che una persona possa anche non attenersi a questa indicazione, ne seguirà soltanto una perdita dell'efficienza globale dovuta a una scelta non ottimale dal punto di vista energetico. All'interno di ogni processo, come vedremo, sono disponibili diverse tecnologie con le quali realizzare l'impianto e ottenere differenti prestazioni. Si ricorda inoltre la versatilità con cui le biomasse possono venir usate anche in molteplici ambiti quali l'elettrico, il termico o i biocarburanti.

2. DESCRIZIONE DEI PROCESSI E DELLE TECNOLOGIE.

2.1 I vari tipi di processi

Quando si vuole sfruttare l'energia delle biomasse e convertirla in una forma più pratica ci sono due tipi di processo a cui riferirsi:

- Processi TERMOCHIMICI
- Processi BIOCHIMICI

I primi, come si può già capire dal nome, basano il loro funzionamento sull'uso del calore. Il calore, infatti, innesca le reazioni necessarie per poter trasformare l'energia chimica in ulteriore calore. L'energia termica risultante può essere usata per scopi termici o impiegata per generare energia elettrica. Fanno parte di questa categoria:

- Combustione Diretta;
- Carbonizzazione;
- Gassificazione;
- Pirolisi.

Sono i processi che verranno approfonditi in seguito dato il possibile uso in ambito elettrico. Le biomasse più utilizzate per queste metodologie sono sostanze che hanno umidità bassa, si parla al massimo del 50%, e un rapporto di carbonio su azoto maggiore di 30. I processi biochimici, invece, basano il loro funzionamento su enzimi, funghi o microrganismi che vengono a formarsi nel materiale in determinate condizioni. Richiedono valori contrari dei parametri di umidità e di carbonio e azoto. Sono utilizzati soprattutto per produrre biocombustibili, ma i loro prodotti possono venir impiegati anche per scopi diversi. Sono inclusi in questo settore :

- Digestione Aerobica;
- Digestione Anaerobica;
- Fermentazione Alcolica;
- Esterificazione degli oli.

All'interno di tutti questi metodi va precisato che, al di là della combustione diretta, tutti gli altri sono metodi volti a migliorare la resa termica della materia prima, a renderne più pratico il trasporto e lo stoccaggio, oppure sono metodi che cercano di ridurre i residui rimanenti dopo l'uso. La maggior parte di essi dà come risultato dei prodotti combustibili (solidi, liquidi o gassosi) che successivamente verranno bruciati in opportune caldaie.

2.2 Combustione diretta

E' sicuramente il processo più conosciuto e semplice. Si basa sull'ossidazione totale del combustibile in presenza di un comburente, l'aria, permettendo così di sfruttare l'energia termica derivante dalla reazione. Viene fatta in caldaie le quali, vista l'esperienza acquisita, hanno generalmente buoni rendimenti dalla loro parte (si parla di valori superiori al 80-85%). Le biomasse più usate per questo procedimento sono quelle di origine legnosa quali legna da bosco ceduo, piante a crescita rapida, etc. Prima di venire utilizzato il materiale viene essiccato per poter ridurre il più possibile il valore di umidità; questa procedura può essere svolta sia in modo naturale che artificiale. Dal punto di vista chimico la combustione viene rappresentata inserendo la molecola della cellulosa nella formula:



Come detto precedentemente, questo è un processo molto maturo e, per tale motivo, ci sono a disposizione numerose tecnologie che puntano a migliorare la resa termica. Le principali tipologie di caldaie presenti sul mercato sono:

- Caldaie a sospensione;
- Caldaie a griglia fissa;
- Caldaie a griglia mobile;
- Caldaie a letto fluido.

A causa del tipo di tecnologia scelta nascono differenti costi e rendimenti tra un impianto e l'altro. Il loro uso per produrre energia elettrica verrà sviluppato nel paragrafo successivo "La combustione diretta per la produzione di energia elettrica".

2.3 Carbonizzazione

La carbonizzazione è un processo di pre-trattamento che consiste nella trasformazione del materiale vegetale (legno) in carbone. Il risultato è il cosiddetto carbone vegetale o carbone di legna. E' un alterazione termochimica che avviene in assenza di aria. Nello specifico si somministra calore in presenza di ossigeno cercando di eliminare tutti quei prodotti volatili e non combustibili (es. acqua). Questo metodo risulta molto simile alla pirolisi, e il carbone vegetale che se ne ricava viene utilizzato o come combustibile, oppure come materia prima da cui ottenere prodotti chimici industriali.

2.4 Gassificazione

Questo procedimento è un'ossidazione parziale in difetto d'ossigeno che avviene a temperature molto elevate, circa 900–1000° C. All'interno della camera di combustione una parte della biomassa viene bruciata per provvedere al calore necessario per innescare le reazioni chimiche del processo. Come risultato porta alla nascita di un gas combustibile la cui composizione è molto eterogenea (si possono trovare anidride carbonica, vapore acqueo, idrocarburi vari, metano e altri gas). La frazione dei vari elementi all'interno del gas stesso dipende dal gassificatore, dal tipo di materiale combustibile e dal livello di umidità. Per questo motivo ci sono diversi tipi di gassificazione:

1. Gassificazione in aria;
2. Gassificazione in ossigeno;
3. Gassificazione in vapore acqueo.

La miscela gassosa risultante assume diversi nomi e altrettanti valori di potere calorifico, a seconda del tipo di gassificazione utilizzata. Le caratteristiche principali si possono vedere nella tabella 3.

■ Tabella 2.1 Caratteristiche dei prodotti delle varie tipologie di gassificazione.

	PCI MJ/Nm ³	Risultato
Gassificazione in aria	5,5÷7,5	Gas di gasogeno
Gassificazione in ossigeno	14	Gas di sintesi
Gassificazione in vapore acqueo	10	

Come si vede dalla tabella, quando si svolge questo tipo di processo in aria otteniamo un prodotto a basso potere calorifico a causa della presenza abbondante di azoto. Per tale motivo, infatti, questo gas di gasogeno viene utilizzato prevalentemente in caldaie. Al contrario, i gas prodotti dagli altri tipi di gassificazione possono essere benissimo usati sia in turbine a gas sia per fare la sintesi di molti materiali (metanolo, idrogeno, ammoniaca, etc.). Si deduce così che, se il nostro processo è inserito in un impianto con lo scopo di produrre energia elettrica, risultano validi solo due tipi di gassificazione. Occorre, però, specificare che le due reazioni in questione sono profondamente diverse e che spesso si ricorre ad un compromesso. Se da un lato la gassificazione in ossigeno è una reazione esotermica, e perciò libera calore utilizzabile, dall'altro la gassificazione in vapore acqueo risulta altamente endotermica. Non solo, mentre il procedimento svolto in ossigeno richiede temperature molto elevate, la stessa cosa fatta in vapore acqueo avviene a valori inferiori. Ne consegue che, nella pratica, si usano miscele di ossigeno e vapore in modo tale da sfruttare la massima resa termica con valori di temperatura non troppo elevati.

In conclusione va detto che, per la gassificazione in aria, è ancora complesso l'uso del gas di gasogeno come vettore energetico. Ciò è dovuto ai problemi di stoccaggio e trasporto che la miscela presenta; per tale motivo spesso si preferisce trasformare il gas in benzine sintetiche con più elevato contenuto energetico.

2.5 Pirolisi

Anche la pirolisi, come i metodi precedenti, si basa su una decomposizione termochimica che avviene fornendo calore a temperature elevate ($400 \div 800^{\circ}\text{C}$) e quasi in totale assenza di ossigeno. La caratteristica di questo processo è quella di avere prodotti sia solidi che liquidi o gassosi. Le proporzioni sono legate al tipo di pirolisi scelto e ai parametri della reazione. Esistono diverse modalità per effettuare la pirolisi:

- Pirolisi lenta;
- Pirolisi convenzionale;
- Pirolisi veloce (Flash pirolisi), la quale si suddivide in due modalità a seconda della temperatura a cui viene eseguita.

Sta di fatto che, a seconda del prodotto che si cerca, si opterà per una pirolisi o l'altra. Per quanto riguarda gli usi le opzioni più convenienti sono i cicli combinati con olio pirolitico, per gli impianti di grande taglia, mentre per quelli più piccoli vengono usati motori a ciclo diesel basati su prodotti pirolitici. Un vantaggio rispetto agli inceneritori è quello che, non essendoci combustione, non vengono immesse nell'atmosfera nanoparticelle molto pericolose per l'uomo. Sistemi di questo genere possono essere usati in diversi ambiti industriali o possono essere applicati per smaltire il cosiddetto RSU. Prima di parlare dei processi biochimici va specificato che appartengono a questa categoria anche altre soluzioni sopra non citate. Esse si possono descrivere come delle varianti ai procedimenti originali, esse sono:

- Co-Combustione;
- Co-Gassificazione

Questi non sono altro che i fenomeni sopra descritti integrati però da combustibili fossili, soprattutto carbone e gas naturale. Più precisamente sono le biomasse che vengono inserite in tali processi per ottenere un risparmio sul consumo di combustibile. Oltre a questa riduzione, che può arrivare fino ad un 20%, il tutto è accompagnato da un calo delle emissioni di anidride carbonica, ossidi di azoto e anidride solforosa.

2.6 I processi biochimici

I processi biochimici, come detto, si basano su microrganismi che nascono all'interno della biomassa in determinate condizioni. Non tutti i processi hanno le caratteristiche idonee per la produzione di energia elettrica, ma vediamoli in dettaglio.

Digestione Anaerobica: è un procedimento di degradazione del materiale organico per mezzo di batteri. Avviene in condizioni di anaerobiosi, ovvero in totale assenza di ossigeno ed è importante perché da come risultati tre tipi di sostanze.

- **Biogas:** è una miscela gassosa composta soprattutto da metano e anidride carbonica con piccole tracce di altri materiali. Ha un buon potere calorifico dell'ordine dei 23 MJ/Nm^3 . Dal punto di vista elettrico il biogas viene maggiormente impiegato per effettuare la cosiddetta cogenerazione attraverso l'uso di motori a scoppio o microturbine. Il calore prodotto o rimane per riscaldare i digestori oppure lo si usa per il teleriscaldamento. L'energia che esce da questo processo viene catalogata come energia verde a basso impatto ambientale, ciò lo si deve al fatto che la CO_2 emessa è già presente nel ciclo del carbonio e può essere contrastata con la semina di altre piante.
- Gli altri due sottoprodotti sono il digestato acido-genico e il digestato metano-genico che, però, dal punto di vista elettrico, non hanno alcun interesse pratico. Si possono utilizzare per ottenere fertilizzanti o altri prodotti chimici.

Gli impianti di digestione anaerobica sono accompagnati da tanti trattamenti ausiliari che permettono di rendere più pratici i sottoprodotti, sia nell'uso che nel trasporto. Ad esempio due di essi sono la deumidificazione del biogas e il filtraggio degli altri digestati. Recentemente si è guardato a questa tecnologia anche per smaltire la parte organica dei rifiuti solidi urbani. Purtroppo in questo caso il processo non risulta compatibile con l'ambiente. Avere la digestione nelle discariche a cielo aperto porta come conseguenza la liberazione di biogas in atmosfera. Questo fatto viene altamente sconsigliato per l'elevato contenuto di metano della miscela gassosa, che incide notevolmente sull'effetto serra del pianeta. Si ricorda, infatti, come il metano vada a ridurre la cosiddetta "finestra atmosferica", unico sfogo per la radiazione terrestre. Il tutto dovrebbe avvenire in grandi digestori chiusi che permettono di recuperare il biogas ma che per le quantità in gioco sono poco economici.

Digestione Aerobica: è un procedimento molto simile al precedente, che però avviene in un ambiente condizionato dalla presenza di ossigeno. La digestione aerobica è caratterizzata dalla produzione di anidride carbonica ed acqua e, con questo processo, avviene il riscaldamento del

substrato. L'energia termica così prodotta viene estratta attraverso scambiatori di calore e utilizzata per far fronte a eventuali utenze termiche.

Fermentazione Alcolica: è un processo di tipo micro-aerofilo che opera la trasformazione dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali in etanolo. Assomiglia molto a quei procedimenti che avvengono nel pane e nel vino ma, visto il risultato, non ha alcuna applicazione in ambito elettrico.

Esterificazione degli oli: non è altro che un reazione chimica che coinvolge una molecola chiamata estere e dell'alcool. Il risultato, un estere e dell'altro alcool, viene lavorato per essere utilizzato nel settore dei biocarburanti.

Questi ultimi metodi non appartengono all'ambito elettrico ma, quando si parla di biomasse, non è possibile non citare le diverse opportunità che questa tecnologia offre. In particolare gli ultimi metodi sono usati per ottenere biocarburanti.

2.7 La combustione diretta per la produzione di energia elettrica

Innanzitutto va precisato fin dall'inizio che, quando si intende utilizzare le biomasse per produrre energia elettrica quasi sempre si ricorre alla cogenerazione. Infatti, le caratteristiche dei combustibili e delle tecnologie impiegate risultano meglio sfruttate in questa maniera, portando in uscita sia energia elettrica che energia termica. Gli impianti per la conversione delle biomasse in energia si basano sulle seguenti fasi:

Stoccaggio ► Conversione ► Combustione ► Produzione dell'energia ► Distribuzione

Si può dire che la combustione è la fase centrale di tutto il processo. Essa fa da collegamento tra due parti: una a valle legata al mondo elettrico che possiamo ritrovare in tutte le centrali elettriche e un'altra a monte che si concentra sul materiale combustibile e sulle sue caratteristiche. Le prime due fasi "accolgono" le biomasse in arrivo e rendono possibile l'attuazione di tutti quei trattamenti necessari per massimizzare la loro resa in caldaia. Le ultime due fasi, produzione e distribuzione, sono composte da tutte quelle macchine preposte alla generazione: turbina, alternatore, trasformatore, etc. Questo processo, composto da cinque passi, nella pratica si esegue secondo due tipi di impianto:

- Impianto termoelettrico tradizionale;
- Impianto ibrido gas-vapore.

Impianto termoelettrico tradizionale

Nell'impianto termoelettrico tradizionale tutti i sistemi che si trovano dopo della caldaia sono uguali a quelli di un impianto convenzionale basato sul ciclo Rankine. La differenza sta proprio nel modo in cui avviene la combustione e, in particolare, bisogna considerare la natura differente del combustibile e il diverso potere calorifico. Mentre da un lato si alimenta la caldaia con materiale liquido o gassoso, quando si utilizzano le biomasse si ha a che fare spesso con sostanze solide e, perciò, bisogna adeguare il sistema di combustione a questo tipo di prodotto. Si deve anche ricordare che il potere calorifico in questione è inferiore ai normali combustibili fossili e, quindi, l'energia che viene sviluppata è minore. Tutto questo si traduce nella scelta di che tipo di caldaia si vuole utilizzare. Per quanto riguarda la parte puramente elettrica dell'impianto le tecnologie sono abbastanza mature e standardizzate. Rimane, perciò, il sistema di combustione l'elemento principale che può far variare le performance da un'installazione all'altra. A questo proposito le principali tipologie a disposizione sono le seguenti:

- Combustione in sospensione;
- Combustione a griglia fissa e mobile;
- Combustione a letto fluido.

La combustione in sospensione

In questo genere di caldaie il materiale viene inserito dall'alto, così facendo il combustibile brucia ad un certa altezza prima di toccare la griglia del fondo. E'una tecnologia molto sviluppata nell'ambito industriale e si è potuto ottimizzarla inserendo sostanze con pezzatura fine e un basso tasso di umidità (<15%). Grazie a queste peculiarità la combustione in sospensione è molto usata, ad esempio, per smaltire gli scarti della lavorazione del legno. Per quanto riguarda il rendimento della caldaia siamo sull'ordine del 80-85%, ma solo con il carico ottimale. Non appena si riduce o si incrementa il lavoro anche i rendimenti ne risentono. Un altro difetto, per quanto riguarda questa tecnologia, sta nei costi di manutenzione: essi risultano elevati vista la grande quantità di ceneri che si formano e si depositano nelle varie zone dell'impianto.

La combustione a griglia fissa o mobile

La griglia, da cui questi processi prendono il nome, è formata da barre o tubi paralleli che costituiscono dei gradini e facilitano l'inserimento del materiale da bruciare e la combustione stessa. La differenza tra la caldaia a griglia fissa e la caldaia a griglia mobile sta nel fatto che nella prima è possibile movimentare l'organo meccanico, mentre nella seconda no.

Per quanto riguarda la griglia fissa è molto diffusa anche in caldaie che non sono usate per scopi industriali, ma che vengono usate per scopi civili. A causa della staticità dell'insieme sono alimentate da combustibili a basso tenore di ceneri, ciò serve ad evitare intasamenti ed ostruzioni degli orifizi per l'aria comburente. Risulta evidente che questa precauzione viene fatta per limitare i costi di pulizia e di manutenzione dell'impianto stesso. Come rendimenti si è sull'80% e questo valore è dovuto alle perdite del materiale incombusto che finisce nelle ceneri e nei fumi. Le caldaie a griglia mobile, invece, cercano di superare i limiti di quelle appena citate. Grazie alla possibilità di muovere la griglia è possibile bruciare combustibili anche con minori prestazioni: ci si riferisce soprattutto al fatto di non avere solo materiali a basso tenore di ceneri o con bassi tassi di umidità. Risulta anche più facile estrarre le ceneri in modo automatizzato, abbassando così sia i costi di manutenzione sia quelli del combustibile. Confrontando i prezzi, a causa della maggiore complessità, quello della caldaia a griglia mobile è sicuramente più elevato. Va detto che, però, la griglia mobile comporta più economia nell'utilizzo dell'impianto. Un problema legato a questa tecnologia è il fatto che temperature eccessivamente elevate possono far perdere alle griglie le loro caratteristiche meccaniche. Per questo motivo si sono studiati diversi sistemi di raffreddamento: per quelle fisse si inietta un getto d'aria da sotto in modo da abbassare la temperatura sulla griglia, per quelle mobili, invece, si fa passare dell'acqua all'interno della struttura cava delle parti meccaniche.

La combustione a letto fluido

La combustione a letto fluido, tecnologicamente parlando, è la tecnica più recente per quanto riguarda i combustibili solidi. Applicata all'inizio per il carbone, si è estesa a diversi tipi di materiali. Il principio di funzionamento è quello di iniettare dal basso un forte getto d'aria attraverso un letto di sabbia. Quest'ultimo, sottoposto a tale forza, si solleva e sottopone le particelle a continua agitazione. Fatto ciò, si inserisce il materiale combustibile in modo da creare un sistema unico tra sabbia e biomassa, che viene mantenuto in sospensione e in continuo rimescolamento. Il tutto assume caratteristiche simili a un fluido, da cui deriva, appunto, il nome "letto fluido". Finché non si arriva ad avere un equilibrio, il tutto viene sostenuto da una griglia. E' sicuramente la tecnologia migliore per diversi motivi:

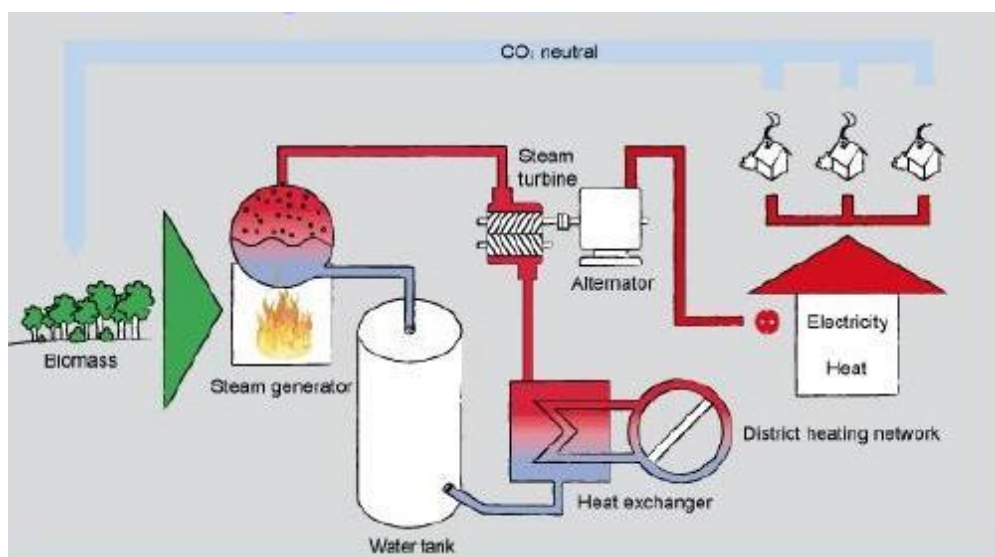
- Limita l'uso dell'aria in eccesso abbassando così le emissioni di NO_x ;
- Raggiunge rendimenti della combustione elevati (>90%);
- I fumi in uscita vengono filtrati in modo da separare le particelle solide dal gas e riciclarle con un nuovo inserimento nel letto fluido;
- Grazie ai tre punti sopra citati si riesce ad avere basse emissioni di anidride carbonica e di idrocarburi incombusti.

A seconda poi delle caratteristiche assunte dal letto fluido esistono diverse tipologie:

- FBC: “fluid bed combustion”, è il letto fluido “normale”, il quale si divide in BFBC (bubbling fluid bed combustion), ovvero letto fluido bollente, e CFBC (circulating fluid bed combustion) letto fluido ricircolato;
- PFCB: “pressured fluid bed combustion” è il letto fluido pressurizzato usato però negli impianti ibridi gas-vapore.

Prende il nome di letto fluido bollente una caldaia in cui la velocità del gas è relativamente bassa (1-1,5 m/s) e la quantità di particelle trascinate via dai fumi è contenuta. Il risultato è un letto che è chiaramente definito del quale è possibile individuare le dimensioni. Al contrario, quando si ha a che fare con un letto fluido ricircolato, il gas assume velocità più elevate (4-8 m/s) da cui si hanno numerosi corpuscoli trasportati dai gas. Il tutto porta ad avere un letto che non ha una forma definita ma spazia all'interno della caldaia, occupando dimensioni nettamente superiori rispetto alla tecnologia precedente. Questo secondo metodo, viste le diverse particelle movimentate, necessita di filtrare i fumi in modo tale da recuperare e reinserire il materiale solido che tenta di fuoriuscire. I vantaggi del sistema ricircolato sono legati soprattutto alla compattezza, in virtù della maggiore velocità di attraversamento e ai minori problemi dovuti allo scambio termico, visto che quest'ultimo avviene fuori dalla zona di combustione. Tale sistema ha anche il pregio di permettere una certa flessibilità per quelle che possono essere le variazioni di carico, cosa più difficoltosa in un BFBC. D'altra parte occorre ricordare che un letto fluido ricircolato richiede più lavoro per quanto riguarda la progettazione e la messa a punto dell'impianto.

■ Figura 2.1: Schema semplificato di un impianto cogenerativo a biomassa



Impianto ibrido gas-vapore (PFBC)

Gli impianti ibridi, come risulta dal titolo, basano il loro funzionamento sul letto fluido pressurizzato (PFBC). Con questa tecnologia la pressione all'interno della camera viene innalzata fino a 10-18 bar, così facendo non si modificano le caratteristiche operative delle caldaie ma si incide sulla densità del comburente e dei gas. In questo modo si riesce ad ottenere dimensioni più compatte, si aumenta la reattività della carica e si incrementa lo scambio termico. Ovviamente per contro si hanno tutte le problematiche per il contenimento della pressione e risultano più complessi gli organi per il caricamento della biomassa. Resta comunque valido il fatto che per le sue peculiarità il PFBC si integra perfettamente con le turbine a gas. In questi impianti ibridi troviamo sullo stesso albero il compressore, utilizzato per fornire l'aria comburente pressurizzata, e la turbina dalla quale ricavare energia meccanica trasformata poi in elettrica. Oltre a questo, il letto fluido pressurizzato permette di estrarre calore dalle reazioni di combustione, integrando così alla funzione di innalzare la temperatura dei gas quella di poter produrre vapore. Ciò avviene nella maggior parte dei casi attraverso l'uso di uno scambiatore di calore che toglie energia termica dai fumi e la cede all'acqua. Come avviene negli impianti a ciclo combinato, l'energia termica ottenuta con questo secondo modo viene utilizzata per incrementare la produzione di energia elettrica attraverso l'uso di una turbina a vapore. Purtroppo questa estrazione di calore, insieme al fatto del minor potere calorifico, fa sì che i gas che arrivano alla turbina siano a temperature inferiori rispetto alle normali turbogas intaccando così i rendimenti del processo. Alla fine, considerando l'intero sistema, si vede come questo metodo sia inferiore al classico ciclo combinato a gas naturale, ma sia più efficiente se paragonato ai cicli a vapore con uguali caratteristiche. Una accortezza che va fatta non solo in questo tipo di impianto ma anche negli altri è quella di scegliere turbine robuste e poco sensibili agli effetti corrosivi. Infatti ricordo che il flusso di gas elaborato da questi organi non è sicuramente depurato e può contenere polveri o particelle che intaccano il sistema. Questo impianto ibrido sarà meglio sfruttato con i processi di gassificazione, i quali portano il tutto ad assomigliare ai cicli combinati attualmente usati.

2.8 La gassificazione per la produzione di energia elettrica

Come già citato nei paragrafi precedenti, gli attuali impianti più efficienti per la produzione di energia elettrica si basano sul cosiddetto ciclo combinato. Dal punto di vista delle biomasse il livello del rendimento di tali strutture è sicuramente impossibile da raggiungere, soprattutto a causa dell'erosione. Questo fenomeno, infatti, è fortemente sentito dalle turbine a gas, le quali, oltre a questo, soffrono particolarmente la corrosione da parte di ceneri fuse o di sali.

Neppure l'abbassamento della temperatura in ingresso turbina (TIT) dai $980\div 1200^{\circ}\text{C}$ ai $700\div 750^{\circ}\text{C}$ ha portato miglioramenti per quanto riguarda questi prodotti, anzi, ha ulteriormente peggiorato quelli che erano i rendimenti del sistema. Per tutti questi motivi è risultato evidente come fosse necessaria una conversione della biomassa in una forma il più possibile priva di ceneri. E' da questo concetto base che nasce la gassificazione del materiale per inserirla in un processo di produzione di energia elettrica. Ovviamente non bastano solo dei gassificatori, ma dobbiamo progettare il tutto tenendo presente che, una volta ottenuto il gas, quest'ultimo va sicuramente depurato e, solo poi, inserito nell'impianto. Le fasi principali di un impianto di questo tipo sono:

- Pre-trattamento della biomassa
- Impianto di separazione dell'aria
- Gassificazione
- Recupero termico dei gas di sintesi
- Sistema di lavaggio dei gas

Durante il pre-trattamento si cercano di ottenere due importanti effetti: quello di rendere più omogenea la biomassa e quello di essicarla, quest'ultimo spesso sfrutta parte del calore prodotto dall'impianto stesso.

Per quanto riguarda il sistema di separazione dell'aria, esso ha lo scopo di creare un ossidante ad alto tenore di ossigeno. Occorre, però, precisare che produrre ossigeno ha un costo elevato in termini di potenza e che incide molto sulla produzione totale di energia elettrica (10%). Per questo motivo l'impianto di separazione può anche non venire inserito se si decide di effettuare la gassificazione in aria, cosa, però, che riduce molto i rendimenti visto il basso potere calorifico in uscita. Un altro motivo, che permette di non usare tale sistema, è il fatto che con l'uso di gassificatori a riscaldamento indiretto si interpone uno scambiatore di calore tra la fonte di energia termica e il gas finale. Così facendo, la miscela gassosa non risente dell'ossidante.

La fase centrale del processo avviene in gassificatori che possono essere costruiti con diverse tecnologie, le principali sono:

- Gassificatori a letto fisso nelle tre modalità: contro-corrente, equi-corrente o crossdraft;
- Gassificatori a letto fluido nelle varie tipologie: bollente, ricircolato, pressurizzato o a pressione atmosferica;
- Gassificatori a letto trascinato.

I gassificatori a letto fisso non hanno le prestazioni di quelli a letto fluido ma presentano facilità di costruzione e, quindi, costi contenuti. Il tutto è costituito da un contenitore cilindrico, che varia a seconda della potenza, e da una griglia, usata per sostenere i materiali inseriti.

La struttura con questa forma garantisce supporto alle biomasse e permette di estrarre le ceneri senza creare problemi per i gas interni. La differenza tra i tre modelli consiste nella posizione in cui vengono inseriti i vari elementi.

Gassificatore a contro-corrente (Up-draft)

Nel gassificatore a contro-corrente (up-draft), ad esempio, il materiale combustibile viene inserito dall'alto mentre l'ossidante (ossigeno, vapore e/o aria) sale dal basso. Man mano che la biomassa scende dall'alto viene sottoposta a essiccazione, pirolisi, ossidazione, il tutto dipende dalle temperature raggiunte che risultano massime alla base della struttura. I vantaggi di questo tipo di reattore sono: la semplicità costruttiva e di funzionamento e l'ottimo scambio termico tra i due flussi che permette di avere gas in uscita a temperature medio-basse (da cui un'elevata efficienza termica). Vista la sua struttura non richiede materiale in ingresso molto secco, l'umidità può arrivare anche al 60%. Dall'altro canto, però, è caratterizzato da una bassa produttività e richiede la depurazione dei gas prima dell'uso visti i catrami che vengono a formarsi. I fluidi gassosi prodotti vengono estratti dalla parte superiore del gassificatore mentre le ceneri dal basso. Storicamente è stato il primo tipo di sistema di gassificazione utilizzato.

Gassificatore a equi-corrente (Down-draft)

Agli stessi livelli di efficienza energetica del precedente si trova anche il gassificatore a equi-corrente (down-draft), il quale permette di ottenere un prodotto più pulito. La struttura è molto simile a quella dell'up-draft ma, in questo caso, l'ossidante viene inserito, più o meno, a metà dell'intero reattore. In questa zona il gassificatore presenta un restringimento della sezione della camera, ciò ha lo scopo di formare una zona compatta ad alta temperatura dove far passare i gas e far avvenire il processo di cracking dei catrami. Il gas risultante viene estratto dalla parte inferiore della struttura accanto al meccanismo per togliere le ceneri. Gli svantaggi maggiori sono dati dalla necessità di avere una granulometria della biomassa omogenea e da un tasso di umidità minore rispetto a quello accettato del up-draft. Un'altra pecca è il fatto che la miscela gassosa risultante ha temperature relativamente elevate che incidono sull'efficienza termica del reattore.

Gassificatore a Cross-draft

Il gassificatore crossdraft rappresenta una soluzione a metà tra i precedenti. Questo prodotto mantiene l'inserimento della biomassa dall'alto e, per quanto riguarda l'ossidante, esso viene immesso trasversalmente come nel down-draft.

La differenza principale sta nel fatto che i gas prodotti vengono prelevati lateralmente compromettendo, però, la capacità del reattore di convertire gli idrocarburi complessi.

Gassificatore a letto fluido

Alla fine, se si vuole delle performance migliori, si deve passare all'utilizzo dei gassificatori a letto fluido. Essi, come i combustori, attraverso un flusso gassoso rendono fluido il letto, creando così un unico sistema dinamico. Questa operazione prende il nome di fluidizzazione. In base alle caratteristiche che assumono si dividono in varie categorie: gassificatori a letto fluido bollente, ricircolato, pressurizzato o a pressione atmosferica. Come detto, hanno una produttività migliore dei reattori a letto fisso e sono più idonei per quei combustibili che formano ceneri corrosive (alcune biomasse, ad esempio). Permettono anche una distribuzione della temperatura più uniforme rispetto ai reattori a letto fisso. Uno svantaggio è la presenza di catrami: il loro quantitativo è una via di mezzo tra quelli formati dal up-draft e il down-draft. Il vero punto critico di queste apparecchiature è il letto inerte: esso infatti può interagire con le ceneri prodotte e, attraverso reazioni chimiche, generare sostanze pericolose e non volute. Per questo motivo spesso al posto della sabbia silicea si utilizzano allumina o composti metallici.

Il gassificatore a letto fluido bollente è caratterizzato dal fatto che all'interno del letto si formano delle bolle di gas che, liberandosi in superficie, ricordano l'ebollizione dei liquidi. In realtà il tutto aiuta la miscelazione delle varie fasi e il continuo rimescolamento. Sono sistemi di dimensioni contenute e adattabili anche a potenze relativamente basse, infatti, se sono a pressione atmosferica, non superano i 25 MWt. Un pregio rispetto ai reattori a letto fisso è quello che permettono un maggiore controllo della temperatura. Così, mentre questo tipo di gassificatore ha una forma più piccola e compatta, quello a letto fluido ricircolato risulta essere più stretto e alto in modo da permettere le maggiori velocità di movimento del materiale. Ciò comporta che le fasi gassose e solide sono in continuo rimescolamento non permettendo una distinta separazione. La conseguenza di ciò è il fatto che questo tipo di reattore viene sempre accompagnato da un ciclone che garantisca l'effettiva divisione delle due parti. Se ciò non fosse, diverse particelle solide verrebbero trasportate via con il flusso d'aria provocando numerosi problemi di malfunzionamento.

Gassificatore a letto trascinato

L'ultimo tipo di gassificatori sono i gassificatori a letto trascinato. Essi usano reagenti nebulizzati e ossigeno inserendoli in regime di equicorrente. Sono caratterizzati da elevate temperature ($>2000^{\circ}\text{C}$) e pressioni che danno come risultato una buona produttività (la migliore) accompagnata, però, da una scarsa efficienza termica.

Gli svantaggi maggiori sono dati dalla grande richiesta di ossigeno e dal fatto che i gas ottenuti devono essere raffreddati prima di ogni altro processo. Viste le temperature in gioco non compaiono catrami o metano nel gas prodotto.

Le tecnologie più diffuse sono quelle basate sul letto fisso per gli impianti più piccoli, o sul letto fluido per i sistemi con maggiore potenza. Si vuole precisare che, all'interno di un gassificatore nella quasi totalità dei casi, avviene anche la pirolisi, ed è per questo che spesso la gassificazione viene vista come un'estensione della stessa. Si potrebbe facilmente dire che, in questi reattori, si innesca una reazione pirolitica tale da avere solo prodotti gassosi (Syngas) e solidi (ceneri estratte). Il recupero termico dei gas di sintesi permette un risparmio energetico nell'intero processo. I gas uscenti dal reattore di gasificazione hanno temperature dell'ordine dei 900-1000 °C, e possono venire impiegati per generare vapore ad alta pressione. Quest'ultimo nei cicli combinati aumenta la resa elettrica, mentre in altri usi partecipa all'essiccazione della materia prima.

L'ultimo trattamento che viene fatto al gas è quello del lavaggio. Questa fase comporta la depurazione della miscela gassosa da parte di tutte quelle particelle inquinanti presenti nel fluido. Si parla soprattutto di particolato, catrami, composti di azoto e molti altri elementi che, se trascurati, portano a malfunzionamenti e corrosioni. Le apparecchiature più usate per depurare il gas sono i cicloni e i filtri. I primi sono macchinari che, attraverso opportune paratie, convogliano la miscela gassosa in un moto vorticoso. In questo modo si esercita sulle particelle una forza tale da convogliarle sulle pareti e, da qui, grazie alla forma dell'oggetto, vengono fatte scivolare in un opportuno scarico nella parte bassa del ciclone. Per quanto riguarda i filtri, essi sono strutture diverse a seconda dell'elemento da abbattere e ne esistono di diverse forme. Spesso fungono da catalizzatore per estrarre le sostanze dai gas.

Nella maggior parte delle volte il gas di sintesi che si ottiene viene integrato in un impianto di produzione di energia come fluido combustibile da usare. Esistono poi casi più ristretti dove il gas fa da fluido motore e non viene bruciato.

■ Tabella 2.2 Riassunto dei pregi e dei difetti delle diverse tipologie di gassificatore

GASSIFICATORE	VANTAGGI	SVANTAGGI
Letto fisso	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia semplice • Basso costo di gestione • Tollera alta umidità • Assenza di carbonio nelle ceneri 	<ul style="list-style-type: none"> • Bassa efficienza • Sconsigliabile per grandi scale
Letto fluido	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura uniforme • Elevate velocità di reazione • Applicabile su grande scala • Alti coefficienti di scambio termico 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta produzione di particolato • Media produzione di catrami • Tecnologia complessa • Richiede pezzatura fine • Elevato punto di fusione delle ceneri e possibile presenza di carbonio in esse
Letto trascinato	<ul style="list-style-type: none"> • Applicabile su grande scala • Grande versatilità • Bassissima produzione di catrami • Completa conversione del carbonio 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta produzione di scorie • Richiede combustibile fine • Tecnologia complessa • Elevati costi di gestione

3. ANALISI

3.1 Premessa

Ma cosa fare se si deve decidere quale tecnologia scegliere, o come progettare l'impianto? Per rispondere bisogna mettersi nei panni di chi, dopo aver visto i procedimenti sopra descritti, deve prendere le decisioni più efficienti e convenienti possibili sull'uso dell'energia. Va precisato che la meta finale è la produzione di energia elettrica da biomasse, magari accompagnata da energia termica in caso di cogenerazione. Si citano comunque, le altre possibilità che vengono offerte da questa tecnologia.

Come prima cosa si deve valutare la materia prima a disposizione, ovvero la biomassa. Si possono distinguere due principali ipotesi da analizzare:

1. La biomassa è già data e su quella si deve basare il tutto;
2. Si ipotizza di poter decidere di quale biomassa disporre.

Nel primo caso sicuramente il ventaglio delle opzioni è più ristretto in quanto si è vincolati a seguire i processi più idonei al materiale che viene fornito. Ciò significa analizzare i parametri di umidità e di carbonio su azoto presenti nella biomassa e restringere il campo a quei processi consigliati dalla tabella 1.2. E' una situazione critica nella quale ci si deve adattare a quello che si trova e in cui non è possibile scegliere lo scopo per cui utilizzare il materiale. Per poter fare un ragionamento più completo si segue, perciò, il secondo caso, così si ha certamente più libertà d'agire. Partiamo quindi dal fatto di poter disporre della materia prima più idonea per l'utilizzo che si vuole effettuare ad esempio, una sostanza ligneo-cellulosica va benissimo per produrre energia elettrica. Fanno parte di questa categoria moltissime specie con caratteristiche diverse, ma il fatto importante è quello di poter trattare questi prodotti attraverso uno dei processi termoelettrici. Oltre a questi, per il momento, si considera anche la digestione anaerobica, la quale è l'unico dei procedimenti biochimici che permette il suo sfruttamento per la generazione elettrica.

A questo punto, dopo aver fatto le opportune analisi di tipo logistico per quanto riguarda lo stoccaggio e l'essiccazione e dopo aver deciso la potenza da installare, si arriva al nodo cruciale: che tipo di processo utilizzare? Non è facile rispondere a questa domanda ma, come abbiamo fatto finora, cercheremo di dare una risposta il più possibile legata ai rendimenti e, perciò, all'efficienza.

3.2 Cogenerazione

Prima di iniziare ad analizzare i vari processi, si è preferito descrivere la cogenerazione, la quale è coinvolta in diversi procedimenti citati sopra e richiamati successivamente. La teoria insegna che con cogenerazione s'intendono tutti quei sistemi che portano alla produzione di due o più forme di energia. Viene definita anche con la sigla inglese CHP, ovvero Cogeneration Heat and Power. Si può facilmente capire che si parla soprattutto di energia elettrica e termica. Non si vuole, in questa sede, spiegare gli aspetti teorici della questione, ma focalizzarsi sulle tecnologie attualmente in commercio per attuarla.

Motori alternativi

I motori alternativi sono apparecchiature che portano ad avere rendimenti elettrici del 30–40%. Grande influenza su questi valori ha la potenza della macchina: per motori piccoli si è più vicini al 30% mentre sopra il MW di potenza si è attorno al 40%. Nell'ambito residenziale sono la tecnologia più diffusa, presentano una buona flessibilità e un costo ridotto (si parla di circa 500 €/kW installato per un impianto “chiavi in mano”). Dal punto di vista termico permettono di fornire energia a diverse temperature, dai 450°C dei fumi di scarico ai 100°C dei liquidi di refrigerazione e lubrificazione. Di grande interesse risulta il fatto di poter alimentare tali motori con il biogas prodotto.

Turbogas

Le turbine a gas sono macchine che, inserite in un impianto di cogenerazione, portano ad un rendimento elettrico del 25%. Sono molto diffuse in ambito industriale e sono più adatte a carichi continui che comportano pochi spegnimenti. Avere tanti “fermi-macchina” porta ad un incremento dei costi di gestione. Il prezzo si aggira attorno ai 700-1000 €/kW installato, sempre con la formula “chiavi in mano”. Anch'esse vengono usate con il biogas o con i gas prodotti dalla combustione o gassificazione della biomasse.

Turbine a vapore

Questa tecnologia è meno diffusa delle altre e la si trova in quelle realtà dove c'è una forte richiesta di energia termica sotto forma di vapore. Infatti comporta rendimenti elettrici attorno al 15% accompagnati da rendimenti termici del 60-70%. Vengono usate soprattutto per il teleriscaldamento e hanno il pregio di poter usare qualsiasi tipo di combustibile in quanto la macchina motrice non è direttamente coinvolta con i prodotti della combustione. Ciò è molto conveniente perché non pone vincoli sulle dimensioni, sulla tipologia o sulla provenienza della biomassa.

Ancor più delle turbogas, le turbine a vapore presentano una scarsa flessibilità e, nella pratica, vengono progettate in base alle richieste di energia. Il costo medio di questo impianto è di circa 400€/kWinstallato.

In tutti i casi ci sono molti fattori da valutare per una corretta stima del rendimento. Tra questi, ad esempio, citiamo il carico di lavoro dell'impianto, nominale o ridotto, le temperature raggiunte e le pressioni interne alle macchine, parametri che, oltre sulle performance, incidono anche sui costi. Esistono altre nuove tecnologie per la cogenerazione, ad esempio le celle a combustibile, ma queste sono le uniche che si integrano con l'uso delle biomasse.

3.3 Digestione anaerobica

La digestione anaerobica ha preso molto piede negli ultimi anni, soprattutto per il fatto che permette di sfruttare una materia abbondante e sempre problematica come i rifiuti. E' una tecnologia che produce biogas, la cui quantità, però, varia molto da che tipo di sostanze si inseriscono nei digestori.

Il gas prodotto da alcune di loro può essere:

- Dai liquami suini si ottengono 0,25-0,5 m³/kg di Solidi Volatili alimentati;
- Dagli scarti alimentari si ricavano 0,5-0,6 m³/kg di SV alimentati;
- Dai contenuti intestinali o dei stomaci si ricava 0,48-0,6m³/kg di SV alimentati;
- Dalla frazione organica del RSU 0,4-0,6 m³/kg di SV alimentati.

Spesso, nella pratica, si fa un'approssimazione del 50% per capire quanta miscela gassosa viene prodotta da una certa quantità. Rimane comunque il fatto che il biogas così ottenuto viene utilizzato o per la cogenerazione o addirittura per i soli scopi termici. Attualmente si preferisce la prima opzione in quanto permette di avere sia energia elettrica che calore per riscaldare i digestori e favorire la reazione. Avere a disposizione energia da cedere alla rete significa incassare degli incentivi i quali, a seconda della dimensione dell'impianto, possono essere dei certificati verdi oppure la cosiddetta tariffa omni-comprensiva. Questi ultimi fattori sono molto importanti per la scelta dell'investimento da fare e per i suoi tempi di ritorno. Si arriva così ad ottenere che con l'uso della cogenerazione i rendimenti complessivi (termico più elettrico) sono del 70-80%, di cui un 30% è rappresentato da quello elettrico. Ovviamente i valori precedenti sono legati solo alla fase della conversione da biogas a calore ed energia, ma come legare il prodotto finale con la materia prima? La risposta viene da alcuni studi recenti fatti dal CTI (Comitati Termoelettrico Italiano) che hanno stimato come da un metro cubo di biogas si può produrre circa 2 kWh di energia elettrica.

Questo dato è molto importante perché permette di trovare due cose:

1. La stima della quantità di biomassa che si deve disporre per effettuare la produzione ipotizzata. Questa analisi può essere fatta con maggiore accuratezza se si conosce il tipo di materiale, altrimenti è valida l'approssimazione del 50%.
2. Un ulteriore conferma del rendimento in gioco. Ricordo, infatti, che il biogas ha un potere calorifico medio di $23\text{MJ}/\text{Nm}^3$ e che vale l'equivalenza energetica $2\text{ kWh} = 7,2\text{MJ}$: un semplice calcolo del rapporto tra l'energia in uscita e quella in ingresso porta ad un rendimento del 31%.

Vista la trasformazione chimica che avviene in questo tipo di digestione non è possibile legare energeticamente la biomassa dell'inizio del processo (in questo caso liquami) con il prodotto finale (energia elettrica). Per cui, per una corretta analisi, si deve tenere conto dei due aspetti: quanta produzione di biogas si ottiene e quale rendimento ha la sua conversione in energia elettrica. Un esempio dei valori in gioco lo si può trovare nella tabella 3.1.

■ Tabella 3.1 Dati relativi a un impianto a digestione anaerobica alimentato con liquami.

Biomassa	Biogas	Energia elettrica prodotta
Da un metro cubo di liquame, sia esso bovino o suino, si ricava: $1\text{ m}^3 = 15\text{ m}^3$ di biogas	Il PCI è fortemente influenzato dalla percentuale di metano presente. Il valore medio è $23\text{ MJ}/\text{Nm}^3$, da cui l'energia risulta: $15 \cdot 23 = 345\text{MJ} = 95,8\text{kWh}$	La produzione è di circa 27 kWh con un rendimento del 28%.

Questi risultati, ovviamente, sono legati al singolo caso e non vanno presi come regola generale. Attualmente il vincolo principale di questa tecnologia sta sulla quantità e la qualità del biogas prodotto, infatti il consumo di biomassa è elevato. Numerosi sono i fattori che incidono sulla produzione del gas influenzando molto il potere calorifico finale. Alcuni di essi sono: il tipo di biomassa, la temperatura del digestore, alcuni parametri bio-chimici.

Per concludere si può dire che questo è un processo sicuramente molto interessante ma non adatto a tutti. Ciò significa che, se si riprendono le due ipotesi iniziali, sul fatto di aver già fissato oppure no che biomassa utilizzare, la digestione anaerobica è più idonea nel primo caso, dove ci è già data la materia prima. Infatti, se si dovesse pensare di costruire l'intera filiera per produrre energia elettrica con questo metodo, si avrebbero dei costi improponibili e il tutto risulterebbe poco realistico.

E' molto più conveniente inserire questo processo in quelle realtà in cui ci sono già come scarti liquami idonei alla produzione di biogas: aziende agricole o aziende nell'ambito caseario. Potranno nascere nuove prospettive di miglioramento quando questo processo verrà applicato in modo più diffuso ai rifiuti; attualmente in Italia esistono pochi impianti, ma in Europa questo processo è abbastanza utilizzato. In questo caso si complica in parte il procedimento di digestione inserendo ulteriori costi per trattare il RSU, mentre rimane invariato l'aspetto dell'uso del biogas.

3.4 La combustione

E' conveniente passare a vedere un altro processo utile per la produzione di energia elettrica come, ad esempio, la combustione. Quando si tratta questa metodologia vanno ricordate le diverse tecnologie a disposizione per quanto concerne il sistema di combustione. Come descritto nei paragrafi precedenti, sicuramente, come caldaia, la più efficiente è quella a letto fluido. Non ha paragoni come rendimenti con le altre caldaie a griglia e a sospensione e, anche sotto l'aspetto delle emissioni, risulta la più vincente. Il problema, o meglio la difficoltà in più, sta nel fatto che con la combustione si possono attuare due tipi di impianto: quello tradizionale e l'impianto ibrido gas-vapore. Quale scegliere? Per quanto riguarda i rendimenti, un confronto viene svolto nella tabella 3.2

■ Tabella 3.2 Rendimenti elettrici dei diversi tipi d'impianto.

Tipologia di impianto	Rendimento elettrico
Impianto termoelettrico tradizionale con turbina a contro pressione	10-15%
Impianto termoelettrico tradizionale con turbina a condensazione	15-20%
Impianto termoelettrico tradizionale di grossa taglia (qualche decina di MW)	25%
Impianto ibrido gas-vapore	20%

(Fonte: "Le energie rinnovabili" A. Bartolazzi)

L'impianto termoelettrico tradizionale mette in esercizio un ciclo a vapore, il quale provoca i bassi rendimenti risultanti. Ciò nonostante viene usato soprattutto per attuare il cosiddetto teleriscaldamento che permette di soddisfare alle richieste di energia termica. Il suo uso per il solo scopo elettrico è sicuramente poco conveniente. Rimane un investimento interessante solo se visto nell'insieme elettrico e termico.

Esistono già impianti che svolgono il teleriscaldamento utilizzando come combustibili le biomasse. Sono sistemi basati sul cippato o su materia di origine legnosa, possono raggiungere potenze installate anche di qualche decina di MW e, spesso, presentano come riserva sistemi di combustione a metano. Come già detto non è sicuramente il metodo migliore se si deve produrre soltanto energia elettrica, ma rimane una buona alternativa se si guarda anche all'aspetto termico. Diventa un progetto del tutto insensato se inserito in quelle realtà prive di biomassa, o dove risulta necessario produrre la biomassa appositamente. Infatti, insieme a bassi rendimenti nella conversione in energia elettrica, avremmo anche ulteriori spese economiche ed energetiche che non giustificerebbero i prodotti che ne derivano.

Per quanto riguarda l'impianto ibrido, al di là dei rendimenti più elevati, esso comporta sicuramente più complessità di progettazione e maggiori costi. Il tutto è dovuto all'utilizzo della caldaia a letto fluido pressurizzato che comporta maggiori problemi di caricamento e di mantenimento della pressione. Gli impianti venivano alimentati con carbone o lignite, ma recentemente si è passati a mescolare il combustibile con biomasse in modo da ridurre il consumo. Questa tecnica prende il nome di co-combustione e rappresenta un passo significativo per le centrali già avviate. Esso consente, infatti, di mantenere le performance attuali riducendo, però, il consumo di un combustibile fossile, qual'è il carbone. Le conseguenze di un approccio simile sono: minori emissioni di inquinanti visto il minor consumo, incasso di incentivi legati alla produzione con biomasse. Attuare tale processo senza materiale fossile porta a rendimenti minori (si sono calcolati valori attorno al 20%). Incide soprattutto il fatto di avere gas combustibili che si espandono a temperature più basse. Per il nostro scopo è un processo interessante da non accantonare però, come vedremo attraverso i procedimenti di gassificazione, alcune prestazioni possono essere migliorate. Come già detto per altri, anche è più conveniente inserire questo processo in quelle situazioni dove si ha già a disposizione la biomassa (scarti industriali, residui o i rifiuti).

3.5 La gassificazione

La gassificazione, come si è già detto, converte la biomassa in un combustibile gassoso il più possibile privo di ceneri. Nasce con lo scopo di eliminare quelle particelle che, create con la combustione, vanno a rovinare i vari macchinari. Nella pratica, per attuare questa operazione, ci sono a disposizione vari tipi di gassificatori, divisi in diverse categorie in base al loro funzionamento. Le più efficienti tecnologie sono:

- Gassificatore a letto fluido bollente. I migliori rendimenti li troviamo nelle apparecchiature sviluppate dalla IGT (Institute of Gas Technology)
- Gassificatore a letto fluido ricircolato tra i quali citiamo i reattori progettati dalla BCL.

Il primo è un sistema a letto fluido bollente, pressurizzato, con riscaldamento diretto e alimentazione a ossigeno. Sono reattori molto simili ai combustori a letto fluido bollente, anch'essi, infatti, presentano velocità di inserimento dell'aria minime (0,8-2 m/s) e dimensioni compatte.

In questo caso, inoltre, i gassificatori sono caratterizzati da valori di pressione che possono arrivare fino a 25 bar. Il loro funzionamento si basa su un riscaldamento diretto e, perciò, non ci sono scambiatori di calore o altri oggetti all'interno della camera. Essi effettuano la reazione in ossigeno garantendo in uscita un gas di sintesi con un buon potere calorifico.

Il secondo sistema, basato sul letto fluido ricircolato, opera in condizioni differenti dal precedente. Innanzitutto ha dimensioni molto diverse in quanto la fluidizzazione veloce costringe ad usare strutture con piccoli diametri e altezze decisamente elevate (fino 8 m). Come il precedente può operare sia a pressione atmosferica sia a valori maggiori. I modelli più diffusi di questo gassificatore utilizzano un riscaldamento indiretto e forniscono energia termica attraverso scambiatori di calore o letti inerti pre-riscaldati. Tale procedura permette di avere un buon potere calorifico anche se l'alimentazione avviene in aria, questo perché non c'è diluizione di azoto durante il processo. Ci si sofferma soprattutto su questi due perché sono i modelli che maggiormente si integrano in un impianto di produzione di energia elettrica. Uno svantaggio legato alla tecnologia del letto fluido consiste nel fatto che necessita di materiale combustibile con granulometria omogenea e di dimensioni medio piccole. Quest'ultima peculiarità, nelle pratica, fa sì che ci sia un opportuno sistema di caricamento per quanto concerne la biomassa. Queste apparecchiature possono essere facilmente inserite nei sistemi a ciclo semplice o in quelli a ciclo combinato. E, su impianti di questo genere, sono già stati svolti dei test alimentando il tutto con biomassa. Si è visto che, usando del bagatex (bagassa di canna da zucchero), il cui potere calorifico è circa 18,44 MJ/kg, risultavano rendimenti elettrici del 28% con il ciclo semplice, mentre si arrivava a 37% per quello combinato, il tutto utilizzando un gassificatore ad aria e a pressione atmosferica, il quale ha un costo limitato ma anche delle performance medie. Si ipotizza che con, l'uso dei reattori pressurizzati e alimentando a ossigeno, tali valori possano essere aumentati a discapito di un rialzo dei costi legati alle apparecchiature. Un esempio di impianto a gassificazione alimentato a biomasse è quello della cittadina austriaca Güssing, tra i primi del suo genere.

La gassificazione, attualmente, rimane ancora un processo che riguarda soprattutto i grandi impianti dove gli alti rendimenti compensano i costi dell'intero procedimento. Va precisato, però, che è in atto uno sviluppo che cerca di far integrare i gassificatori anche per impianti medio-piccoli. Infatti, sono nati solo in quest'ultimi anni moduli completi che comprendono gassificatore, filtri, e generatore anche per potenze ridotte. Sono strutture che cercano di semplificare l'impianto, raggruppando le varie parti e creando un sistema più facile da assemblare e vendere.

Una semplice distinzione vigente sul mercato consiglia che, per impianti sotto un 1 MW di potenza, vengano usati gassificatori a letto fisso per la cogenerazione attraverso motori a combustione interna; per gli impianti di potenza elevata (sopra i 10 MW) vengano usati reattori a letto fluido con turbine a gas. Nel caso si superassero i 25 MW si consiglia l'integrazione dei gassificatori a letto fluido all'interno di un impianto a ciclo combinato. Queste scelte, supportate anche da analisi economiche, risultano le più convenienti per l'uso della gassificazione, però, il tutto viene lasciato alla discrezione del progettista. I sistemi a ciclo combinato con integrata la gassificazione vengono denominati IGCC, dall'acronimo inglese "integrated gasification and combined cycle". I principali problemi da risolvere per una corretta integrazione sono due:

1. Forte integrazione del processo. Ci si riferisce soprattutto a quei gas prodotti e utilizzati dalle due parti che devono trovare un corretto impiego guardando quello che è il recupero energetico dell'intera conversione.
2. La necessità di effettuare la depurazione dei gas a bassa temperatura (intorno ai 100°C).

Sul primo punto si può dire che molto è stato fatto con i gassificatori più moderni, anche se rimane il grande problema della produzione d'ossigeno di elevato costo energetico. Per quanto riguarda il secondo aspetto, per il momento, si cerca di utilizzare soprattutto gassificatori a letto fluido o trascinato. Nel prossimo futuro si prevedono l'inserimento di filtri a caldo, ma intanto si continua con la depurazione a bassa temperatura cercando di recuperare in parte il calore in gioco.

La gassificazione è l'unica tecnologia attuale operante con le biomasse che consente di poter costruire l'intera filiera per la produzione di energia elettrica. Al giorno d'oggi, infatti, le colture energetiche coltivate vengono utilizzate la maggior parte per i biocarburanti, il resto per soli scopi termici oppure per alimentare centrali basate su questo processo. In minor numero, ci sono colture dedicate a centrali a combustione, ma risultano poco rilevanti. Le principali specie usate sono colture zuccherine e ligno-cellulosiche, sia erbacee che arboree, come, ad esempio: mais, sorgo, pioppo e robinia.

Un altro aspetto della gassificazione è il fatto che essa permette di poter trasportare il gas prodotto prima di utilizzarlo. E' una situazione possibile sulla carta ma che raramente si presenta nella pratica, perché un trasporto della miscela introdurrebbe ulteriori costi nel processo di generazione. Infatti, quasi tutti gli impianti attuali presentano nello stesso sito sia il gassificatore che le macchine per la produzione di energia elettrica. Il trasporto del prodotto potrebbe essere più utile se impiegassimo il gassificatore in un sistema di tele-riscaldamento. In quel caso la logistica potrebbe richiedere che il generatore elettrico venga posizionato in particolari luoghi, meglio congeniali per lo sfruttamento dell'energia termica.

3.6 Osservazioni

Molto importante per le biomasse è la tracciabilità della stessa, ovvero tutta quella documentazione che permette di poter capire con precisione la provenienza del materiale usato. Potrebbe sembrare banale ma il luogo di provenienza di una sostanza influenza tantissimo le sue caratteristiche chimiche e fisiche. In un processo di conversione dell'energia avere delle peculiarità rispetto ad altre incide molto sui prodotti delle reazioni. Attraverso la tracciabilità della biomassa si possono capire la qualità del prodotto con cui si ha a che fare, in modo tale da poterlo gestire al meglio e rispettare i vincoli ambientali imposti. E' un accortezza da considerare perché gli impianti medio-piccoli tendono a favorire comportamenti poco virtuosi dal punto di vista eco-compatibile. Sulla tracciabilità del prodotto si basano anche gli incentivi economici che sono concessi alle biomasse e al biogas. Il ministero delle politiche agricole, per quanto riguarda l'ambito italiano, definisce i parametri essenziali per tutti i materiali catalogati come biomasse e per tutti gli aspetti legati alla tracciabilità. Alcune importanti definizioni introdotte dal ministero sono:

- Biomassa e biogas derivanti da prodotti agricoli, di allevamento e forestali;
- Biomassa da intese di filera;
- Biomassa da filera corta.

Tutte le categorie appena elencate comprendono prodotti, rifiuti e residui provenienti dal settore agricolo, della silvicoltura e dalle industrie connesse. Molto importante è il fatto che con “filiera corta” s'intende una biomassa la cui origine è all'interno di un raggio di 70 km dall'impianto di produzione di energia.

Come detto, un aspetto importante da tenere presente sono gli incentivi. Come tutti gli impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili anche le biomasse sono sostenute dall'ente governativo. Attualmente si hanno:

- La tariffa omnicomprensiva di 0,28 € per ogni kWh prodotto per gli impianti alimentati da biomasse o biogas con una potenza installata minore di 1 MW
- I certificati verdi per gli impianti alimentati da biomasse o biogas con taglia superiore ad 1 MW, in cui il coefficiente dei certificati viene posto a 1,8.

Gli incentivi sulle biomasse vigenti oggi tengono molto conto della filera corta prima citata, agevolando quelle produzioni che riducono i costi per procacciarsi la materia prima. Diverse associazioni del settore energetico (ad esempio AEEG) hanno però chiarito come la filiera corta non sia l'unico aspetto da tener conto per aiutare questo settore. Hanno proposto, quindi, di basare l'aiuto economico sull'efficienza energetica dell'utilizzo delle biomasse. Questo perché, soprattutto le operazioni di coltivazione, concimazione, trasporto e trasformazione, inducono un elevato consumo energetico da fonti convenzionali (combustibili fossili).

Quindi, per sfruttare del tutto i vantaggi legati alle biomasse, (minori emissioni di CO₂) sarebbe più corretta un incentivazione basata sull'efficienza e monitorata con i sistemi di controllo e di gestione presenti in questi impianti.

Il sostegno economico spesso comporta che investimenti dal punto di vista energetico non convenienti possano risultare economicamente interessanti. E' un problema generale che tocca anche altri settori e che complica il lavoro a chi deve fare delle scelte e prendere decisioni. Occorre, però, sempre ricordare che le biomasse vanno prodotte, e nessun incentivo potrà rendere valido un impianto in zone prive o scarse di materia prima. Si tiene a sottolineare che, comunque sia, un investimento in qualunque fonte rinnovabile non può prescindere da quelli che sono i rendimenti energetici dell'impianto.

Un altro aspetto poco tecnico che riguarda le biomasse è quello dell'accettabilità dei grandi impianti. Come per altre centrali elettriche alimentate da diversa fonte o come per gli inceneritori, anche le biomasse hanno trovato spesso ostacoli dalle persone coinvolte dall'impianto. Sono sorti, infatti, comitati contrari, ricorsi all'ente giuridico e procedure varie che hanno impedito un agevole iter per le centrali. Non sono situazioni legate a tutti gli impianti, questo va precisato, ma non si devono sottovalutare se si ha in progetto centrali di medio-grande taglia. Questo ultimo fatto è un ulteriore motivo del perché, quando si parla di biomasse, si intendono soprattutto impianti relativamente piccoli.

■ Tabella 3.3 Riassunto dei pregi e dei difetti dei vari processi usati con le biomasse.

Tipologia di processo	Vantaggi	Svantaggi
Digestione Anaerobica	<ul style="list-style-type: none"> • Va usata la dove è già presente la biomassa. • Viene sempre seguita da un processo di cogenerazione. • Impianti di piccola taglia, sempre sotto il MW installato. La maggior parte degli impianti ha dimensioni tra il 100-300 kW. • Le uniche emissioni sono date dalla combustione del biogas e sono relativamente basse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Non è adatta se si vuole iniziare la filiera da zero. • Visti i consumi di materia prima non conviene per grandi impianti. • Rendimenti elettrici di conversione del biogas attorno al 30%, da cui vanno tolti gli auto-consumi, si arriva a cedere 20% dell'energia prodotta. • Il biogas prodotto è a basse temperature.

Combustione	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta numerose tipologie di caldaie. • Ha costi contenuti per l'impianto tradizionale. • Viene usata per il teleriscaldamento. • Taglie medio – piccole, non si superano qualche decine di MW 	<ul style="list-style-type: none"> • Non è adatta se si vuole iniziare la filiera da zero. • Se si esclude l'aspetto termico ha basse performance. • Elevato tenore di inquinanti nei fumi che comporta l'uso di filtri antiparticolato e abbattimento dei NOx SOx.
Gassificazione	<ul style="list-style-type: none"> • Può essere considerata se si vuole iniziare una filiera da biomasse. • Ha i rendimenti energetici più alti rispetto le altre tecniche. • Impianti di diversa taglia, abbinandola alla cogenerazione per bassa potenza (<1MW) e a cicli combinati per potenze (>25MW)elevate. 	<ul style="list-style-type: none"> • E' un processo molto costoso soprattutto per elevate potenze. • Spesa energetica per il pre-trattamento della biomassa. • Richiede cicloni e filtri per depurare il gas prodotto, il quale se bruciato emette principalmente CO₂. Gli altri inquinanti sono abbattuti precedentemente.

CONCLUSIONI

Con il presente lavoro si è cercato di descrivere cosa sono le biomasse e gli scopi per cui possono essere impiegate. Al contrario di tutte le altre fonti energetiche le biomasse hanno una caratteristica unica: devono essere prodotte! Questo può sembrare un fatto ovvio e banale, ma è la parte centrale di questa risorsa. Infatti, come si è visto, non tutte le tecnologie attuali sono idonee per iniziare una filiera che parta dalla coltivazione ed arrivi fino alla produzione di energia. I costi, che aggraverebbero il chilowattora così generato, sarebbero tali da non giustificare l'intero processo. Non solo, ma anche dal punto di vista energetico, si avrebbe a che fare con rendimenti molto bassi viste le diverse azioni che richiedono energia.

Ma allora che farne? La vera sfida futura per le biomasse sta in due settori diversi. Il primo è il fatto di poter migliorare filiere produttive già in esercizio. Ciò significa inserire la generazione elettrica (o la cogenerazione) in quelle realtà in cui le biomasse ci sono già ma non vengono utilizzate. Ci si riferisce soprattutto a quelle situazioni che producono questi materiali come scarto o rifiuto derivante da vari trattamenti. Così facendo si riuscirebbe a togliere la produzione della biomassa dal percorso energetico e avere un migliore sfruttamento delle sostanze che, altrimenti, andrebbero quasi sempre perse. Se si riesce a procurare la materia prima come appena detto, si può, grazie ai processi visti, iniziare una conversione energetica che risulta essere conveniente. Ovviamente si dovrà calibrare il miglior procedimento per la materia con cui si ha a che fare e il tutto sarà diverso a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche possedute (come si è già visto, sono in particolare i liquami, gli scarti industriali o i rifiuti), magari studiando soluzioni ancor più efficienti.

Il secondo aspetto è il fatto di poter iniziare interi processi energetici che, partendo da zero, ovvero dalla coltivazione della biomassa, arrivino ad avere l'energia elettrica. Esistono già a livello attuale delle filiere in cui si coltiva la materia prima, rappresentata soprattutto da materie legnose o vegetali (specie a crescita rapida, il pioppo, il mais o la colza). Non sono strade da sottovalutare, anzi, vanno incentivati gli studi che puntano a un miglioramento dell'intero processo e toccano le diverse discipline coinvolte. Si pensa che, in questo ambito, si possano fare dei passi avanti che agevolano il percorso incrementando rendimenti e diminuendo i costi. Al giorno d'oggi, però, sono situazioni ancora un po' critiche perché i consumi delle centrali sono elevati e i terreni che servirebbero a soddisfarli sono molto estesi. Si sta cercando il giusto compromesso tra la potenza dell'impianto, quindi i consumi, e lo spazio disponibile alla produzione di biomasse. Sono nate così, ad esempio in Brasile, alcune dispute su qual è il miglior uso da fare delle terre, beni preziosi per numerose attività dell'uomo. In certe nazioni un limite a questa tecnologia sarà proprio questo: non avere grandi territori per la coltivazione delle specie imporrà un uso limitato di questa risorsa.

Attualmente, come visto nelle descrizioni dei processi, le biomasse sono più utili in impianti piccoli con potenze ridotte. Non è ancora concepibile una centrale a biomasse del livello di quelle termoelettriche attuali: i rendimenti, il consumo di materia prima e anche i costi non lo consentono. Risulta più fattibile la realizzazione di tanti piccoli impianti, inseriti nei giusti contesti con potenze medio-piccole, in grado anche di soddisfare a esigenze di tipo termico. Per tale motivo si vedono di buon occhio i moduli (soprattutto di piccola potenza) che concentrano in sé gli organi essenziali dell'impianto, sempre più facilmente installabili e utilizzabili nelle piccole realtà. Per fare questo occorre che si diffondano maggiormente anche su larga scala e che risulti più chiara la tecnologia migliore non solo per il tipo di biomassa ma anche per la dimensione dell'impianto.

Un'elevata penetrazione dell'uso delle biomasse può essere d'aiuto per raggiungere gli obiettivi energetici fissati dalla comunità europea per il 2020. Infatti non va dimenticato come ogni paese del vecchio continente abbia dei propri target fissati sulla crescita dell'efficienza energetica e sullo sviluppo delle fonti rinnovabili. Per tale motivo le biomasse sono incentivate economicamente e possono fare la loro parte per rispettare gli obblighi sopra citati.

Concludo dicendo che questa tecnologia mai potrà compensare e sostituire il ruolo dato oggi alle fonti basate su combustibili fossili, però, in un periodo storico dove le conseguenze dell'effetto serra sono sempre più evidenti, qualunque mezzo che possa limitare l'uso delle fonti tradizionali va adoperato. Ed è in questo senso che le biomasse possono, e devono, essere usate; certamente con molti limiti, ma coscienti dei diversi pregi che la tecnologia possiede.

BIBLIOGRAFIA

- Bartolazzi Andrea, “Le energie rinnovabili”, casa editrice Hoepli pubblicato nel 2005.
- En.cor srl Energia Correggio “Dati tecnici dell’impianto di cogenerazione da gassificazione di sostanze ligneocellulosiche”.
- Energie-Rinnovabili.net in “Impianti generazione energia da fonti rinnovabili”.
- EUBIA, European Biomass Industry Association “Simultaneous production of Electricity and Heat”, RESTMAC Brochures 2007.
- ITABIA, Italian Biomass Association “Rapporto 2008 – I traguardi della bioenergia in Italia”.
- MultiUtility & Renewable Energy articolo “Il futuro delle biomasse” del luglio 2008.
- Ralph P. Overend “Thermochemical conversion of biomass” da “Renewable energy sources charged with energy from the sun and originated from earth-moon interaction” contenuto in EOLSS, Encyclopedia of Life Support Systems.
- Prabir Basu, “Combustion and gasification in fluidized beds”, casa editrice Taylor & Francis pubblicato nel 2006.